

# 温度对鳊鱼静止代谢和耐低氧能力的影响

陈波见<sup>①</sup> 曹振东<sup>①</sup> 付世建<sup>①\*</sup> 王宇翔<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup> 重庆师范大学进化生理与行为学实验室 重庆市动物生物学重点实验室 重庆 400047;

<sup>②</sup> 女王大学生物系 金斯顿 加拿大 K7L 3N6)

**摘要:** 以鳊鱼 (*Parabramis pekinensis*) 幼鱼 [体重 (  $8.13 \pm 0.15$  ) g,  $n = 31$  ] 为研究对象, 以密闭式代谢测定法分别在 15、20、25、30℃ 条件下测定其静止代谢率 (Rest Metabolic Rate, RMR), 并以双线法推算临界氧浓度  $P_{crit}$  等相关参数。结果显示, 鳊鱼幼鱼的静止代谢水平呈随温度上升而升高的变化趋势 [ (  $132.22 \pm 4.97$  ) mg O<sub>2</sub> / ( h·kg ) ( 15℃ ), (  $182.67 \pm 12.49$  ) mg O<sub>2</sub> / ( h·kg ) ( 20℃ ), (  $218.44 \pm 9.20$  ) mg O<sub>2</sub> / ( h·kg ) ( 25℃ ), (  $298.32 \pm 9.96$  ) mg O<sub>2</sub> / ( h·kg ) ( 30℃ ) ], 除 20 ~ 25℃ 间, 其他各温度组差异显著 (  $P < 0.05$  );  $Q_{10}$  值均低于 2 ( 15 ~ 20℃ 1.91, 20 ~ 25℃ 1.43, 25 ~ 30℃ 1.87 ); 本研究还发现, 随着温度的升高, 鳊鱼幼鱼的  $P_{crit}$  逐渐下降, 而临界氧饱和度  $S_{crit}$  则相对保守 [ 15、20、25、30℃ 的  $P_{crit}$  分别为 (  $1.35 \pm 0.09$  )、(  $1.16 \pm 0.19$  )、(  $0.97 \pm 0.12$  ) 和 (  $0.86 \pm 0.09$  ) mg O<sub>2</sub> / L,  $S_{crit}$  分别为 13.87%  $\pm$  0.74%、13.32%  $\pm$  1.72%、12.15%  $\pm$  1.35% 和 11.34%  $\pm$  0.65% ]。这表明, 采用不同指标考察鱼类耐低氧能力可能会得到相异的结论。这种结论的不一致提示, 在鱼类应对环境溶氧降低的适应中, 相对溶氧水平而不是绝对溶氧水平影响并决定着鱼类的适应性进化, 因此采用相对饱和度作为指标研究鱼类耐低氧能力可能更具理论价值。

**关键词:** 鳊鱼; 温度; 静止代谢; 耐低氧能力

中图分类号: Q965.128 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2010)05-01-08

## Temperature Effect on Rest Metabolic Rate and Hypoxia Tolerance in Chinese Bream *Parabramis pekinensis*

CHEN Bo-Jian<sup>①</sup> CAO Zhen-Dong<sup>①</sup> FU Shi-Jian<sup>①\*</sup> WANG Yu-Xiang<sup>①②</sup>

(<sup>①</sup> *Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology,*

*Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;*

<sup>②</sup> *Department of Biology, Queen's University, Kingston, ON, K7L 3N6, Canada)*

**Abstract:** Rest metabolic rate (RMR) was measured using sealed respirometer and critical oxygen concentration ( $P_{crit}$ ) was calculated using two-segmented straight lines method on Chinese Bream *Parabramis pekinensis* weighed  $8.13 \pm 0.15$  g ( $n = 31$ ) at 15, 20, 25 and 30℃. The RMR was  $132.22 \pm 4.97$ ,  $182.67 \pm 12.49$ ,  $218.44 \pm 9.20$  and  $298.32 \pm 9.96$  mg O<sub>2</sub> / ( h·kg ) respectively at 15, 20, 25 and 30℃ with an ascending trend with temperature. There was a significant difference between groups (  $P < 0.05$  ) except for the RMR at 20 and 25℃. The  $Q_{10}$  value were less than 2 [ 1.91 ( 15 - 20℃ ), 1.43 ( 20 - 25℃ ), 1.87 ( 25 - 30℃ ) ] in all the

基金项目 国家自然科学基金项目 ( No. 30700087 ), 重庆市高校优秀人才支持计划项目, 重庆市自然科学基金项目 ( No. 2010BB1089 );

\* 通讯作者, E-mail: shijianfu9@hotmail.com;

第一作者介绍 陈波见, 男, 硕士研究生; 研究方向: 鱼类生理生化; E-mail: chenbojian1985@126.com。

收稿日期: 2010-04-12, 修回日期: 2010-07-02

groups. The  $P_{crit}$  was  $1.35 \pm 0.09$ ,  $1.16 \pm 0.19$ ,  $0.97 \pm 0.12$  and  $0.86 \pm 0.09$  mg O<sub>2</sub>/L,  $S_{crit}$  was  $13.87\% \pm 0.74\%$ ,  $13.32\% \pm 1.72\%$ ,  $12.15\% \pm 1.35\%$  and  $11.34\% \pm 0.65\%$  at 15, 20, 25 and 30°C, respectively. The results revealed that  $P_{crit}$  decreased as temperature increasing while  $S_{crit}$  was relative stable with temperature change. Our study suggests that the conclusion of study on hypoxia tolerance capability in fish would be varied with different indices measured. It also indicated that in the process of fish physiological adaptation to hypoxia, the effect of relative oxygen saturation rather than the absolute oxygen concentration played determination role. Therefore, critical oxygen saturation index may be better practical in fish hypoxia tolerance study.

**Key words:** Chinese Bream (*Parabramis pekinensis*); Temperature; Rest metabolic rate; Hypoxia tolerance

鱼类的生理活动总是受各种环境因子的影响,其中温度和溶氧的作用备受关注。温度不仅影响着鱼类的生理活动<sup>[1]</sup>,而且影响着水中的溶氧水平。一方面,随着温度的上升鱼类的代谢水平随之提高,对氧的需求逐渐加大;另一方面,由于水的特殊理化性质,其本不充足(水中溶氧量很少超过水体的1%)的溶氧随着温度的上升,氧饱和度还会进一步降低,这使得鱼类摄氧难度进一步加大。这两种因子的影响及其交互作用对鱼类生存造成了严重的挑战,成为鱼类适应性进化的重要驱动力之一。

根据鱼类应对环境氧浓度变化的策略不同,将鱼类划分为氧调节者和氧顺从者<sup>[2]</sup>。氧调节者在环境氧浓度下降过程中能够保持相对稳定的代谢水平,维持正常的生理功能;直到溶氧水平低于临界氧浓度( $P_{crit}$ )之后,代谢率才会随着溶氧水平的继续下降而降低,在这个过程中鱼类将更多依赖于无氧代谢提供能量。而氧顺从者在整个溶氧水平降低过程中均不能保持相对稳定的代谢水平,它的代谢率随环境溶氧水平的下降而降低,整体生理功能也随之降低<sup>[3]</sup>。对于调节者而言, $P_{crit}$ 越低,其耐低氧能力越强<sup>[4]</sup>。氧调节者适应低氧的生理机制主要包括以下几个方面:通过提高呼吸频率,增大呼吸体积<sup>[5]</sup>,以维持稳定的鳃部水环境氧分压;通过凋亡鳃丝间质细胞而产生结构改变,扩大鳃丝表面积,以增强摄氧能力<sup>[6]</sup>;还可以通过加快心率、提高每搏输出量、增加血细胞数目或提高血红蛋白的氧亲和力,以加快整体血液循环并增强血细胞携氧能力<sup>[7-8]</sup>。而氧顺从者在面对低氧时往往缺乏上述机制,无法维持稳定的代谢水平致使部分或整体生理功能关闭或

降低<sup>[9]</sup>。

鱼类耐低氧能力是否也会受温度变化的影响,目前还没有完全一致的观点。有研究显示 $P_{crit}$ 是随温度的上升而上升的<sup>[10-11]</sup>;有的研究则发现 $P_{crit}$ 是与温度不相关的<sup>[12]</sup>;还有研究发现 $P_{crit}$ 会随着温度的升高而降低<sup>[13]</sup>。鳊鱼(*Parabramis pekinensis*)为温水性鲤科鱼类,广泛分布于长江水域中下层水体。三峡库区春泄、秋泄会导致水温的反季节变化<sup>[14]</sup>,库区水位的上升和淤泥中有机质的分解加剧了中下层水体的缺氧环境。本研究以鳊鱼幼鱼为实验对象,考察不同温度(15、20、25、30°C)对其静止代谢率和耐低氧能力的影响,旨在揭示鲤科鱼类应对温度变化和急性低氧的生理适应机制,同时可为三峡库区保护生物多样性工作提供有益资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验鱼的来源与暂养

实验用鳊鱼幼鱼购自重庆合川市西南大学继续教育学院水产校,并于实验室自净化循环控温水槽(专利号:ZL200520010485.9)中适应性暂养2周。实验用水为曝气后自来水,暂养水温( $15 \pm 1$ )°C。溶氧水平 $\geq 8$  mg/L,每日以人工饲料(粗蛋白34.0%,粗纤维7.0%,粗灰分15.0%,总氨基酸1.65%)饱足投喂1次,日换水量约为暂养水体的10%,光制为12 L:12 D。从暂养2周的幼鱼中挑选身体健康,体重接近( $8.13 \pm 0.15$ )g的31尾鳊鱼幼鱼作为实验对象。

### 1.2 实验方案与操作方法

#### 1.2.1 温度驯化

将适应性驯化后的鳊鱼幼

鱼随机分为 4 个实验组 [15℃ ( $n = 8$ )、20℃ ( $n = 7$ )、25℃ ( $n = 8$ )、30℃ ( $n = 8$ )] ,除 15℃ 驯化组外 ,其他 3 个实验组均从初始驯化水温 ( $15 \pm 1$ )℃ 以每日 1℃ 的速率升温至设定的温度 ,并在相应温度下驯化 2 周。饲喂水平和光周期同适应性驯化 ,实验前 24 h 禁食。

**1.2.2 静止代谢率测定** 实验采用密闭式呼吸室测定静止代谢率 ,测定装置结构如图 1 所示。B 为有机玻璃材质圆柱体 (直径  $\Phi = 50$  mm) 呼吸室 ,因为鱼在不同温度下耗氧率不同 ,

为保证各温度组都能在相近的时间内完成测定 ,故不同温度选用不同体积的呼吸室 [270 ml (15℃ 组)、330 ml (20℃ 组)、330 ml (25℃ 组)、740 ml (30℃ 组)] ,呼吸室外以遮光材料贴附 ,避免外界干扰。其一端为螺旋式端盖 ,内有胶圈密封。另一端为水泵 A ,图示箭头方向为微水流循环方向。C 为氧含量测定探头 ,连接溶氧仪 (HQ20 ,Hach Company ,Loveland ,Colorado , USA)。

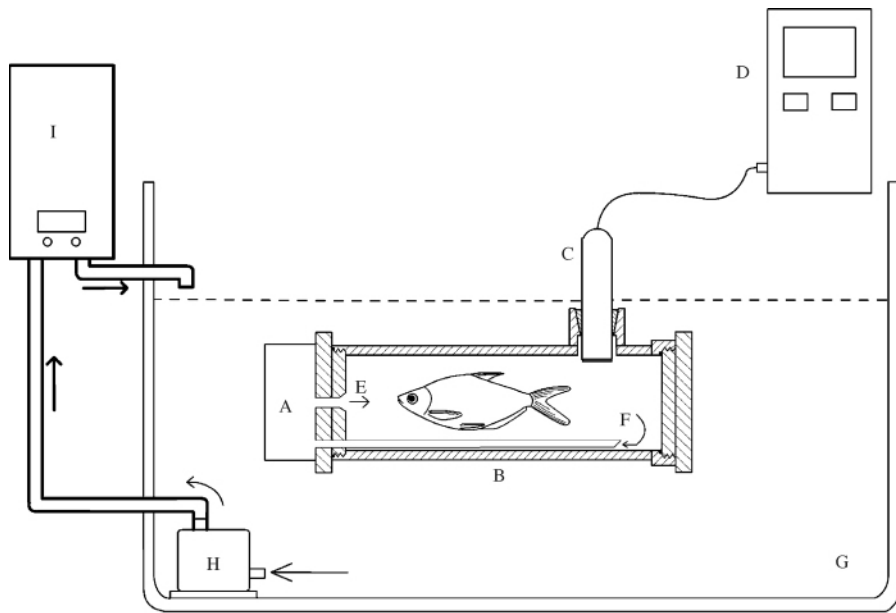


图 1 封闭式鱼类代谢测定装置

Fig.1 Sealed fish  $MO_2$  determination device

A. 循环水泵; B. 呼吸室; C. 氧探头; D. 溶氧仪; E. 出水口; F. 入水口; G. 水浴水槽; H. 水泵; I. 水处理及控温装置。

A. Pump; B. Respiration chamber; C. Oxygen probe; D. Oxygen meter; E. Outlet; F. Inlet; G. Bathing tank; H. Pump;

I. Temperature control and water processing system.

实验时将鳊鱼幼鱼从驯化水槽中驱赶入与测定呼吸室同尺寸的有机玻璃管内 ,封闭端口 ,带水转移至恒温水槽中 ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) ;之后将其与测定用呼吸室对接 ,诱导实验鱼进入呼吸室驯化 24 h ,期间呼吸室后端盖为充满筛孔 (孔径 5 mm) 的 ,以实现呼吸室内外水体交换。开始静止代谢率测定时 ,端盖换为实心有机玻璃材质 ,以实现呼吸室密封。更换端盖时动作轻柔 ,封闭呼吸室 5 min 后 ,待实验鱼恢复平静时

开始静止代谢率测定。数据采样为每 3 min 测定一次溶氧值。所有实验鱼都在 90 ~ 180 min 内完成测定。实验结束后测量鱼体重。测定过程中出现剧烈活动行为的实验鱼 ,其数据不予统计。

**1.3 参数计算** 根据溶氧变化和实验鱼体重大小计算实验鱼的静止代谢率 (RMR) 的变化。

$$RMR = \Delta O_2 \times V / (m \times t) \quad (1)$$

式中  $\Delta O_2$  是相邻两次溶氧水平 (mg/L) 的差

值,  $V(L)$  是呼吸室及附属循环系统扣除鱼体积后的体积, 鱼的体积根据其体重折算得到,  $t$  为两次测定间隔时间 (0.05 h),  $m$  为鱼体重 (kg)。

$Q_{10}$  值用于表征温度对动物体内生理过程快慢的影响, 其公式为:

$$Q_{10} = (R_2/R_1)^{10/(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

式中,  $Q_{10}$  为温度系数;  $T_2$ 、 $T_1$  为驯化温度;  $R_2$ 、 $R_1$  为  $T_2$ 、 $T_1$  温度下实验鱼的静止代谢率。

根据溶氧水平 DO 和与 RMR 之间的关系, 采用“双线法 (two-segmented straight lines)”求出 RMR 随溶氧下降而出现显著下降的拐点, 即为临界氧浓度 ( $P_{crit}$ )<sup>[15]</sup>, 该点的氧饱和度即为临界氧饱和度  $S_{crit}$ 。  $P_{crit}$  以上的 RMR 为 B 段,  $P_{crit}$  以下的 RMR 为 A 段, 并对 A、B 段进行直线拟合。

1.4 数理统计 实验数据以 Excel 进行常规计算, 采用 Statistica 4.5 进行单因素方差分析。统计值均以平均值±标准误 (Mean ± SE) 表示, 显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

2.1 温度对鳊鱼幼鱼静止代谢率的影响 鳊鱼幼鱼在 15、20、25、30℃ 的静止代谢率呈逐渐升高的趋势 (图 2), 其值分别为:  $132.22 \pm 4.97$  ( $n = 8$ )、 $182.67 \pm 12.49$  ( $n = 7$ )、 $218.44 \pm 9.20$  ( $n = 8$ )、 $298.32 \pm 9.96$  ( $n = 8$ )  $\text{mg O}_2 / (\text{h} \cdot \text{kg})$  (表 1), 其中除 20℃ 组与 25℃ 组外, 其他各组代谢率之间皆差异显著 ( $P < 0.05$ )。  $Q_{10}$  值分别为 15 ~ 20℃ 间 1.91, 20 ~ 25℃ 间 1.43, 25 ~ 30℃ 间 1.87。

表 1 温度对鳊鱼幼鱼静止代谢率及  $P_{crit}$  参数的影响

Table 1 Effect of temperature on RMR and  $P_{crit}$  parameters in juvenile *Parabramis pекinensis*

温度 Temperature (℃)	体重 Weight (g)	A 段斜率 Slope of A	$P_{crit}$ 处代谢率 Metabolic rate at $P_{crit}$ [ $\text{mg O}_2 / (\text{h} \cdot \text{kg})$ ]	B 段斜率 Slope of B	B 段平均代谢率 Mean metabolic rate of B [ $\text{mg O}_2 / (\text{h} \cdot \text{kg})$ ]	B 段平均代谢率的 $Q_{10}$ $Q_{10}$ of mean metabolic rate of B
15	$8.35 \pm 0.20^a$	$101.00 \pm 8.67^a$	$130.58 \pm 4.93^a$	$0.52 \pm 0.93^a$	$132.22 \pm 4.97^a$	1.91
20	$8.13 \pm 0.29^a$	$165.76 \pm 16.73^b$	$181.54 \pm 16.23^b$	$0.18 \pm 2.28^a$	$182.67 \pm 12.49^b$	1.43
25	$8.10 \pm 0.41^a$	$243.90 \pm 18.55^c$	$215.54 \pm 12.33^b$	$0.82 \pm 1.35^a$	$218.44 \pm 9.20^b$	1.87
30	$7.95 \pm 0.32^a$	$342.88 \pm 28.74^d$	$266.23 \pm 13.04^c$	$11.44 \pm 1.72^b$	$298.32 \pm 9.96^c$	

a, b, c 表示同一列数据上标字母不同的数据之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

a, b, c: values in the same list with different superscripts are significantly different ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 温度对鳊鱼幼鱼耐低氧能力的影响

2.2.1 温度对鳊鱼幼鱼  $P_{crit}$  和  $S_{crit}$  的影响 本实验中鳊鱼幼鱼在 15、20、25、30℃ 的  $P_{crit}$  分别为 ( $1.35 \pm 0.09$ )、( $1.16 \pm 0.19$ )、( $0.97 \pm 0.12$ ) 和 ( $0.86 \pm 0.09$ )  $\text{mg O}_2 / \text{L}$ , 而  $S_{crit}$  则分别为  $13.87\% \pm 0.74\%$ 、 $13.32\% \pm 1.72\%$ 、 $12.15\% \pm 1.35\%$  和  $11.34\% \pm 0.65\%$  (图 3), 可以看出, 随着温度升高,  $P_{crit}$  和  $S_{crit}$  均呈下降的变化趋势, 但  $P_{crit}$  下降更为明显, 而各温度组的  $S_{crit}$  却差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2.2 温度对鳊鱼幼鱼 $P_{crit}$ 其他参数的影响

$P_{crit}$  以上的静止代谢率 (B 段) 的斜率分别为  $0.52 \pm 0.93$ 、 $0.18 \pm 2.28$ 、 $0.82 \pm 1.35$ 、 $11.44 \pm 1.72$  (表 1), 可以发现, 随着温度的上升, 斜率

基本保持不变, 但当温度达到 30℃ 时, 斜率显著加大, 且与其他各组数据差异显著 ( $P < 0.05$ )。而  $P_{crit}$  以下的代谢率 (A 段) 的斜率分别是  $101.00 \pm 8.67$ 、 $165.76 \pm 16.73$ 、 $243.90 \pm 18.55$ 、 $342.88 \pm 28.74$  (表 1), 其变化趋势为随温度上升, 斜率逐渐加大, 各温度组间差异皆显著 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

3.1 温度对鳊鱼幼鱼静止代谢率的影响 鱼类静止代谢是衡量其生理功能状态的常用指标, 温度对鱼类静止代谢的影响已有很多报道, 一般情况下, 鱼类在适宜温度范围内, 代谢水平随环境温度的上升而升高。报道显示斑马鱼

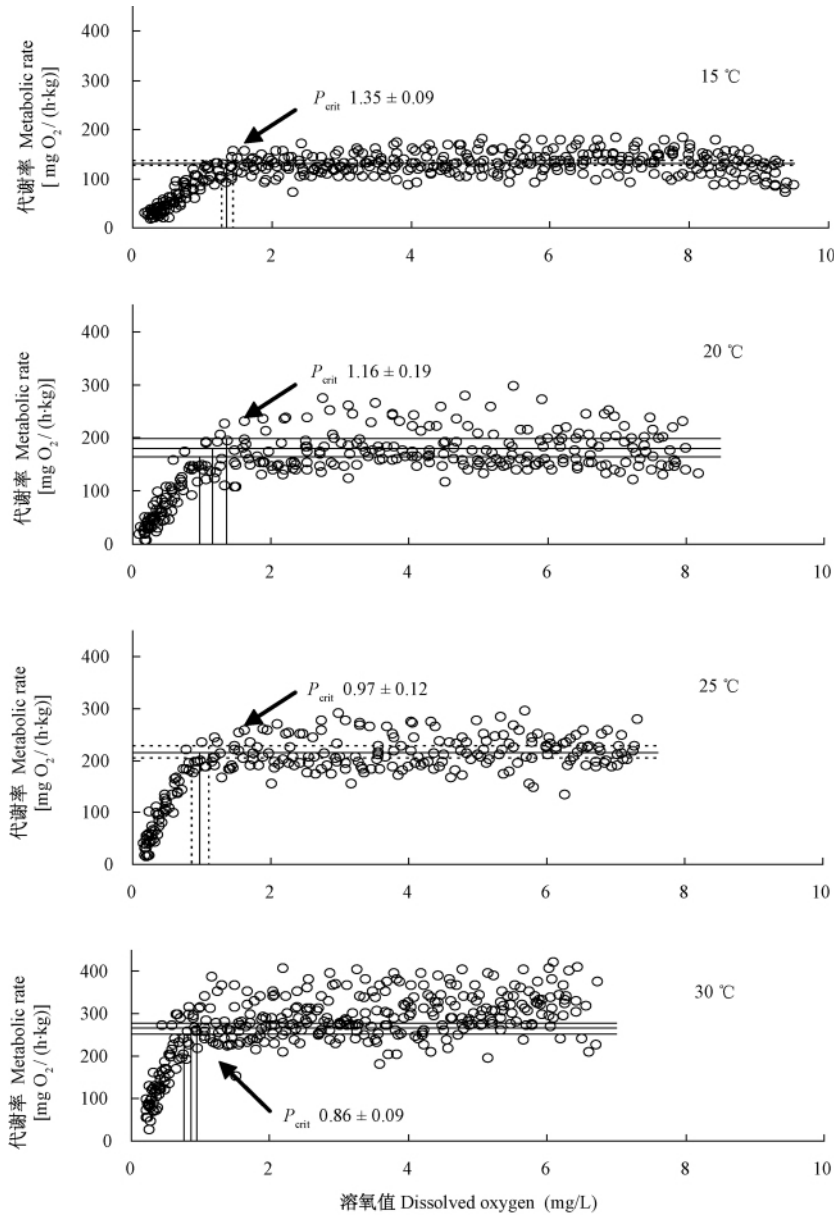


图 2 温度和溶氧对鳊鱼幼鱼代谢率的影响

Fig. 2 Effect of temperature and dissolved oxygen on  $MO_2$  in juvenile *Parabramis pекinensis*

(*Danio rerio*) 幼鱼代谢率和心率都随着环境温度的上升而逐渐上升<sup>[16]</sup>; 极地鱼类生存于低温环境, 代谢水平远低于温带和热带鱼类, 而其代谢率也随温度上升而升高<sup>[17]</sup>。本研究显示, 鳊鱼作为温水性的鲤科鱼类, 其代谢水平随着温度的升高而上升 (表 1); 在相似条件下, 其静止代谢率与其他已报道的鲤科鱼类, 如草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、花鲢 (*Hemibarbus*

*maculatus*) 水平相当<sup>[18-19]</sup>, 但明显高于同水体的鲇型目鱼类, 如南方鲇 (*Silurus meridionalis*) 和 黄颡鱼 (*Peltebagrus vachelli*)<sup>[20-21]</sup>, 这可能与鲤科鱼类较活跃的特性有关。鱼类生理指标随温度上升而变化的程度以  $Q_{10}$  值表示, 本研究结果显示鳊鱼在整个温度区间内 (15 ~ 30°C)  $Q_{10}$  值较低 (1.72), 表明在此区间温度没有对鳊鱼产生明显的生理胁迫, 可以认为该温度范围

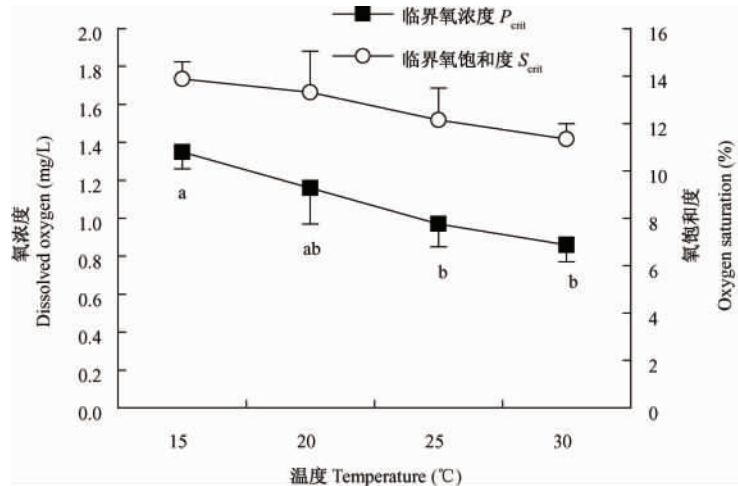


图3 不同温度下鳊鱼幼鱼  $P_{crit}$  和  $S_{crit}$  的变化

Fig. 3  $P_{crit}$  and  $S_{crit}$  in juvenile *Parabramis pekinensis* at different temperatures

a, b: 表示同一曲线数据上标字母不同者差异显著 ( $P < 0.05$ )。

a, b: Values in the same curve with different superscripts are significantly different ( $P < 0.05$ ).

是其适宜温区;进一步分析可以发现,在 20 ~ 25°C 的  $Q_{10}$  值最低 (1.43), 这表明该温度区间可能为鳊鱼幼鱼的最适温区。

**3.2 温度对鳊鱼幼鱼耐低氧能力的影响**  $P_{crit}$  作为鱼类耐低氧能力的指标在鱼类生理学的相关研究中被广泛采用<sup>[22]</sup>。由于临界氧浓度 ( $P_{crit}$ ) 选用的量纲不同,其表述也不尽相同:通常情况下,临界氧浓度采用 mg  $O_2$ /L 作为量纲,而当量纲为 mmHg 时为临界氧压,为 % 时则称为临界氧饱和度 ( $S_{crit}$ )。据报道,在 30°C 条件下,长背鲫 (*Carassius auratus grandoculis*) 和大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 的  $P_{crit}$  分别为 1.32 和 1.93 mg  $O_2$ /L<sup>[23]</sup>;对亚马逊地图鱼 (*Astronotus ocellatus*) 的研究发现,体重大的鱼其  $P_{crit}$  [(34.3 ± 4.1) torr, 1 torr = 1 mmHg] 低于体重小的鱼 [(74.4 ± 3.5) torr]<sup>[24]</sup>。本研究发现鳊鱼幼鱼的  $P_{crit}$  [(0.86 ± 0.09) mg  $O_2$ /L, 30°C] 均低于上述报道,说明鳊鱼具有较强的耐低氧能力,支持有关鲤科鱼类具有较强低氧耐受能力的结论<sup>[25-26]</sup>。

有关温度对鱼类  $P_{crit}$  影响的资料多数仅以单一量纲进行表述。有研究发现鳕鱼 (*Gadus morhua*) 的  $S_{crit}$  在 5、10、15°C 条件下分别为

16.5% ± 2.4%、23.2% ± 5.3%、30.3% ± 5.9% ,  $S_{crit}$  呈现显著上升的变化特征<sup>[27]</sup>;鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) 的  $P_{crit}$  对温度变化具有一定的保守性,在 10、15、20°C 条件下均为 20 mmHg<sup>[12]</sup>;而镖鲈 (*Etheostoma*) 的  $S_{crit}$  会随着温度的升高而降低<sup>[13]</sup>。以上研究资料表明,不同鱼类  $P_{crit}$  的温度反应特征不尽相同。以相对氧饱和度为量纲的  $S_{crit}$  是对  $P_{crit}$  另一种表述。本实验分别采用  $P_{crit}$  和  $S_{crit}$  评价鳊鱼幼鱼的耐低氧能力,发现随着温度上升,鳊鱼幼鱼的  $P_{crit}$  明显下降,而  $S_{crit}$  则相对稳定,这表明采用不同指标考察鱼类耐低氧能力可能会得到相异的结论;这种结论的不一致提示,在鱼类应对环境溶氧降低的适应中,相对溶氧水平而不是绝对溶氧水平影响并决定着鱼类的适应性进化;因此采用相对饱和度作为指标研究鱼类耐低氧能力可能更具理论价值。影响鱼类耐低氧能力而表现在使  $P_{crit}$  降低的生理机制主要包括:降低基础代谢水平(表现为静止代谢率下降),增强红细胞载氧能力[表现为血红蛋白氧半饱和度 (oxygen half-saturation in hemoglobin  $P_{50}$ ) 降低]和提高摄氧能力(表现为鳃表面积增大)等 3 个方面<sup>[28]</sup>。本研究实验鱼的静止代谢率逐渐升高而  $P_{crit}$  逐渐下降,推测鳃

表面积和  $P_{50}$  的改变对鳊鱼耐低氧能力有着更大的影响。相关研究显示,石鲈 (*Scorpaena porcus*) 和海鲤 (*Diplodus annularis*) 在短期低氧处理后尽管红细胞数目增多,而血细胞的  $P_{50}$  则几乎不变<sup>[29]</sup>。这可能是由于短期低氧条件下,鱼没有足够的时间完成红细胞的蛋白修饰以提高氧亲和力和。鳊鱼幼鱼在经历 1 h 左右的低氧过程中可能也没有时间改变其  $P_{50}$ 。那么  $P_{crit}$  的逐渐下降很有可能是由鳃部的适应性结构变化所致。鲤科鱼类的鳃部可塑性极强<sup>[6]</sup>,研究发现,在分别经历 24 h 低温低氧和高温常氧后,鲫鱼 (*Carassius carassius*) 鳃丝的间质细胞均出现明显凋亡而使鳃丝表面积增大<sup>[30-31]</sup>,而在高温低氧条件下鳊鱼幼鱼的鳃结构是否发生适应性结构变化的相关研究值得关注。

## 参 考 文 献

- [1] Brett J R. Energetic responses of salmon to temperature. A study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *American Zoology*, 1971, 11: 99 - 113.
- [2] Steffensen J F. Oxygen consumption of fish exposed to hypoxia: Are they all oxyregulators or are any oxyconformers? *Proceedings of the Ninth International Symposium*, Capri, Italy, 2006, April, 24 - 28.
- [3] McKenzie D J, Steffensen J F, Korsmeyer K, et al. Swimming alters responses to hypoxia in the Adriatic sturgeon *Acipenser naccarii*. *Journal of Fish Biology*, 2007, 70: 651 - 658.
- [4] Henriksson P, Mandic M, Richards J G. The osmorepiratory compromise in Sculpins: impaired gas exchange is associated with freshwater tolerance. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2008, 81: 310 - 319.
- [5] Randall D. The control of respiration and circulation in fish during exercise and hypoxia. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 100: 275 - 288.
- [6] Nilsson G E. Gill remodeling in fish—a new fashion or an ancient secret? *Journal of Experimental Biology*, 2007, 210: 2403 - 2409.
- [7] Gamperl A K, Farrell A P. Cardiac plasticity in fishes: environmental influences and intraspecific differences. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207: 2539 - 2550.
- [8] Silkin Y A, Silkina E N. Effect of hypoxia on physiological biochemical blood parameters in some marine Fish. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2005, 41: 527 - 532.
- [9] Burggren W W, Randall D J. Oxygen uptake and transport during hypoxic exposure in the sturgeon *Acipenser transmontanus*. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 1978, 34: 171 - 183.
- [10] Fry F E J, Hart J S. The relation of temperature to oxygen consumption in the goldfish. *Biological Bulletin*, 1948, 94: 66 - 77.
- [11] Fernandes M N, Rantin F T. Respiratory responses of *Oreochromis niloticus* (Pisces, Cichlidae) to environmental hypoxia under different thermal conditions. *Journal of Fish Biology*, 1989, 35: 509 - 519.
- [12] Ott M E, Heisler N, Ultsch G R. A re-evaluation of the relationship between temperature and the critical oxygen tension in freshwater fishes. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 1980, 67: 337 - 340.
- [13] Ultsch G R, Boschung H, Ross M J. Metabolism, critical oxygen tension, and habitat selection in darters (*Etheostoma*). *Ecology*, 1978, 59: 99 - 107.
- [14] 郭文献,夏自强,王鸿翔,等.近 50 年来长江宜昌站水温变化的多尺度分析. *水利学报*, 2008, 39: 1197 - 1203.
- [15] Yeager D P, Ultsch G R. Physiological regulation and conformation: a basic program for the determination of critical points. *Physiological Zoology*, 1989, 62: 888 - 907.
- [16] Barrionuevo W R, Burggren W W.  $O_2$  consumption and heart rate in developing zebrafish (*Danio rerio*): influence of temperature and ambient  $O_2$ . *American Journal of Physiology*, 1999, 276R: 505 - 513.
- [17] Johnston I A, Clarke A, Ward P. Temperature and metabolic rate in sedentary fish from the Antarctic, North Sea and Indo-West Pacific Ocean. *Marine Biology*, 1991, 109: 191 - 195.
- [18] 徐钢春,顾若波,闻海波.温度对花鲢耗氧率和排氮率的影响. *湖泊科学*, 2006, 18: 431 - 436.
- [19] 周洪琪,潘兆龙,李世钦,等.草鱼代谢能的研究. *水产学报*, 1998, 22: 28 - 32.
- [20] 陈锦云,曹振东,谢小军.温度对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止代谢的影响. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2003, 28: 618 - 621.
- [21] Zeng L Q, Zhang Y G, Cao Z D, et al. Effect of temperature on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen)

- following exhaustive exercise. (under revision)
- [22 ] Chapman L J , Chapman C A , Nordlie F G , et al. Physiological refugia: swamps , hypoxia tolerance and maintenance of fish diversity in the Lake Victoria region. *Comparative Biochemistry and Physiology A* ,2002 ,133 : 421 – 437.
- [23 ] Yamanaka H , Kohmatsu Y , Yuma M. Difference in the hypoxia tolerance of the round crucian carp and largemouth bass: implications for physiological refugia in the macrophyte zone. *Ichthyology Research* ,2007 ,54 : 308 – 312.
- [24 ] Scott G R , Wood C M , Sloman K A , et al. Respiratory responses to progressive hypoxia in the Amazonian oscar , *Astronotus ocellatus*. *Respiratory Physiology and Neurobiology* ,2008 ,162 : 109 – 116.
- [25 ] Miura T. Ecological notes of the fishes and the interspecific relations among them in Lake Biwa. *Japanese Journal of Limnology* ,1966 ,27 : 49 – 72.
- [26 ] Yuma M , Hosoya K , Nagata Y. Distribution of the freshwater fishes of Japan: a historical overview. *Environmental Biology of Fishes* ,1998 ,52 : 97 – 124.
- [27 ] Schurmann H , Steffensen J F. Effects of temperature , hypoxia and activity on the metabolism of juvenile Atlantic cod. *Journal of Fish Biology* ,1997 ,50 : 1166 – 1180.
- [28 ] Mandic M , Todgham A E , Richards J G. Mechanisms and evolution of hypoxia tolerance in fish. *Proceeding of Royal Society B* ,2008 ,276 : 735 – 744.
- [29 ] Silkin Yu A , Silkina E N. Effect of hypoxia on physiological biochemical blood parameters in some marine fish. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology* , 2005 ,41 : 527 – 532.
- [30 ] Sollid J , De Angelis P , Gundersen K , et al. Hypoxia induces adaptive and reversible gross-morphological changes in crucian carp gills. *The Journal of Experimental Biology* ,2003 ,206 : 3667 – 3673.
- [31 ] Sollid J , Weber R E , Nilsson G E. Temperature alters the respiratory surface area of crucian carp *Carassius carassius* and goldfish *Carassius auratus*. *The Journal of Experimental Biology* ,2005 ,208 : 1109 – 1116.